

ホール素子によるスラスト玉軸受の玉の運動解析

浦 晟*・中 嶋 明*・森 高 秀四郎*

The Analysis of A Ball Motion in Thrust Ball Bearing
through Hall Elements Devices.

by

Akira Ura, Akira Nakashima, Hideshiro Moritaka

The rotational behaviour of a ball in thrust ball bearing is much more complicated and usually brings more difficulties due to its mechanical structures than the other bearings.

Furthermore as the contact pressure is extremely high because of being a line contact or a point contact the noise and fatigue failures are comparably easily occurred between both rolling-sliding surfaces.

Accordingly we can find a lots of respectable papers related with the two dimensional measurements on ball bearings like the paper by Hirano.

The motion of the balls, however can be analysed more precisely through the Hall effect devices which have been set inside a pocket of the retainer three-dimensionally in the thrust ball bearing.

As we could obtained a few remarkable date as the results, we will report those results and discuss the considerable points.

1. 諸 言

ころがり軸受における転動体の転走面内の運動は三次元的にはその機構上非常に複雑である。さらに接触面が点接触或は線接触であるため潤滑条件などころがりすべり面のコントロール如何では疲労寿命や騒音の問題を誘起し機能に大きな影響が及ぶ。従って従来、玉の運動については多くの研究者によって巧みな計測方法で研明されており2次元計測については平野らによる玉磁化の計測方法がとくに有名である。しかし3次元的な計測を行えば、玉のコントロール面の交代など理論的挙動からのずれをより明らかに解明することが可能になる。本研究では磁気センサーの1つであるホール素子のスラスト玉軸受の保持器のポケットにx, y, z方向に取り付けることにより2次元計測では不明であったところの玉の挙動を3次元的に明らかにしたので以下にまとめて報告する。

2. 検出法の原理

実験に用いたホール素子をFig.1に示すように磁界中におき、電流 I_c を流すとホール電圧 V_H が生じ、その大きさは次式で与えられる。

$$V_H = (R_H/b) \cdot I_c \cdot B \cos \theta \cdots \cdots \textcircled{1}$$

ここで R_H はホール係数、 b は素子の厚さ、 B は磁束密度、 I_c は制御電流。これらの物性値はホール素子の特性として決まるので制御電流 I_c を一定にしておくと V_H の変化を計測することにより角 θ の変化即ち磁束密度の変化を求めることができる。

Fig.2に示すように玉の中心oを原点としたx軸(半径方向)y軸(円周方向)z軸(スラスト方向)にそれぞれホール素子を取り付けて一定直流電流 I_c を流し各ホール素子からの電圧 V_{Hx} , V_{Hy} , V_{Hz} を計測すると①式により3軸からの磁界の角度 α , β , γ が求まる。

昭和61年4月30日受理

*機械工学第II学科

(Department of Mechanical Engineering II)

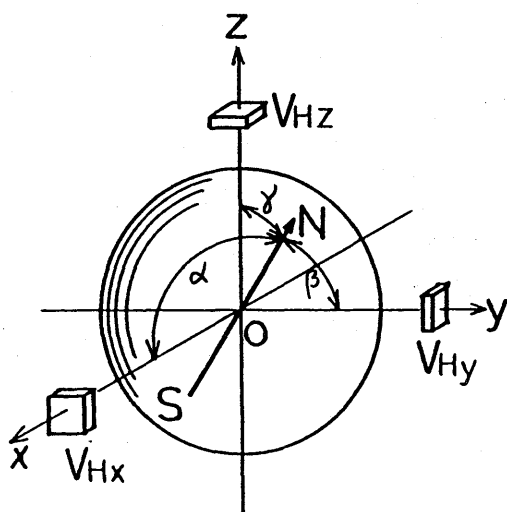


Fig. 1 Location of the Hall elements

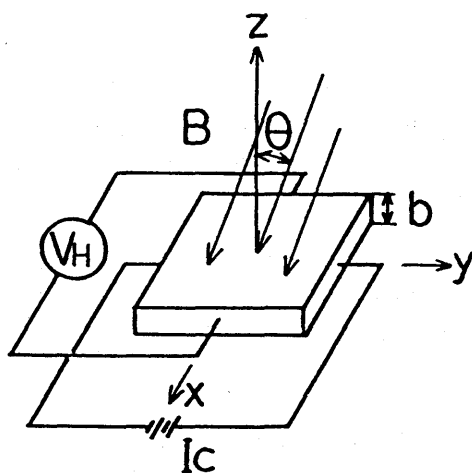


Fig. 2 Principle of Hall effect devices

3. 実験装置及び実験条件

実験装置の概略図をFig. 3 に示す。試験軸受は単列スラスト玉軸受で上輪固定、下輪回転の方法をとり、荷重は200N, 400N, 600N及び800Nの死荷重を使用した。軸回転数及玉の自転はそれぞれFigの⑫の部分にとりつけている磁石及⑥の部分のホール素子によって検出しスリップリング通して計測した。試験に使用した軸回転数は各600, 1000, 1500, 2000, 3000rpmである。供試軸受の諸元は Table. 1 に示す。

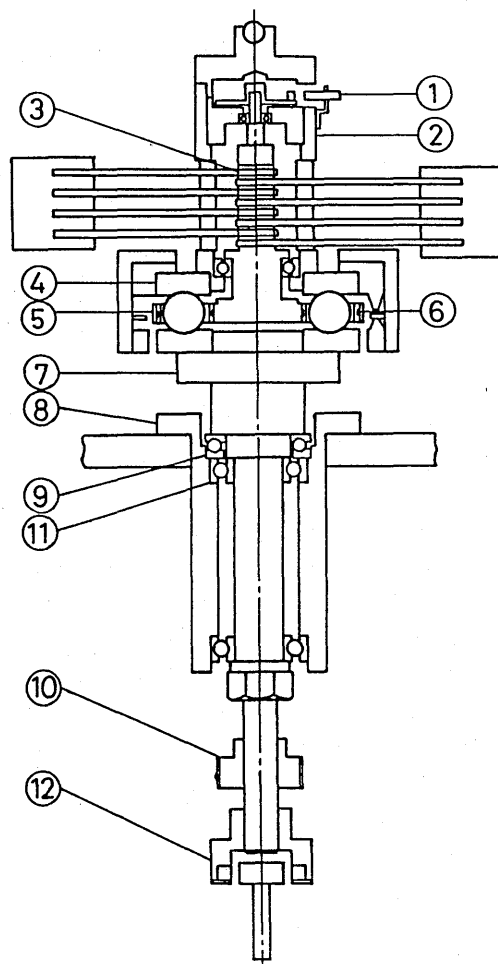


Fig. 3 Bearing testing machine.

- ③ slip ring for measurement
- ④ upper race of bearing
- ⑤ Hall elements for measurement
- ⑫ magnet for detecting rotation

Table 1 Experimental Condition

Revolutions per minute of axis	600, 100, 1500, 2000, 3000
Thrust load(N)	200, 400, 600, 800
Bearing balls used	SUJ(Bearing steel) SUS(Stainless steel) BS(Brass) Nylon
Operating condition	Dry condition, Lubricated condition
Running duration	30 sec. , 2 hours

Total of the ball used in experiments are eight, and the three cases are tried as following.

- 1) the case in which all of eight balls have same size.
- 2) the case in which 4 balls of balls have different size.
- 3) the case in which 4 balls of balls contain another material.

4. 計測部の構成

ホール素子による x , y 方向の検出は Fig. 4 (a)(b) に示すように感度を上げるために素子を向かいあわせて対にして使用, x , y 方向で合計 4 個取り付けている。 z 方向の検出はスラスト玉軸受の機構上容易ではない。ここでは Fig. 4(b) に示すように転走面の外側に計測用ジグを取り付けその上に 3ヶ所のホール素子を設け磁束密度を増すために絞りを入れた。ホール素子を 3 個取り付けたのはホール素子による発生電圧に磁化球ボールの位置による差が発生しないようにするためである。

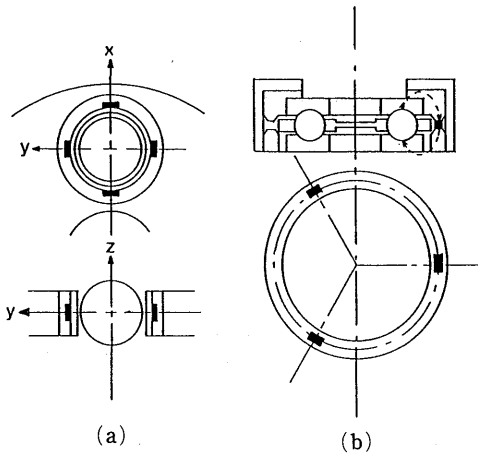


Fig. 4 Principle of measurement

5. スラスト玉軸受の玉の運動解析

Figs 5, 6 において x , y , z 軸各方向の単位ベクトルをそれぞれ \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} とする。またベクトル的に玉の自転角速度を $\vec{\omega}_b$, 公転角速度を $\vec{\omega}_c$, 軸回転速度を $\vec{\omega}_i$

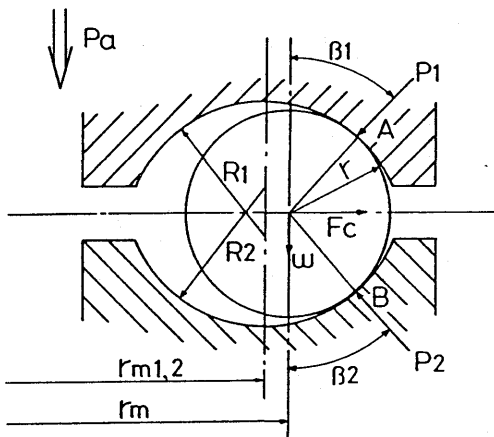


Fig. 5 Displacement of ball

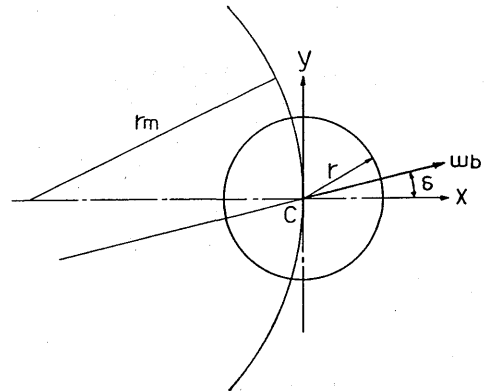


Fig. 6 Definition of the each angle between two axis

であらわし玉の自転軸が空間的に一般的な角度を保つ場合を考え $\vec{\omega}_b$ が x , y 平面に対して角度 γ , z , x 平面に対して δ 傾いているものとする

$$\vec{\omega}_b = \omega_b (\vec{i} \cos \gamma \cos \delta + \vec{j} \cos \gamma \sin \delta + \vec{k} \sin \gamma) \dots (2)$$

$$\vec{\omega}_c = \omega_c \vec{k} \dots (3)$$

玉中心 C にたいする固定輪 (ここでは上輪), 回転輪 (下輪) の相対速度をそれぞれ $\vec{\omega}_1$, $\vec{\omega}_2$ とすれば

$$\vec{\omega}_1 = -\omega_c \vec{k} \dots (4) \quad \vec{\omega}_2 = (\omega_i - \omega_c) \vec{k} \dots (5)$$

で与えられる。

玉と転走面の間で並進運動に対するすべりが無いものとする y 方向, つまり \vec{j} 方向成分は 0 となる。即ち玉が純ころがり運動を行っている場合の玉の自転角速度 ω_b , 玉の公転角速度 ω_c , 軸の回転角速度 ω_i の関係が求められる。

$$\frac{\omega_c}{\omega_b} = \frac{r (\cos \gamma \cos \delta \cos \beta_1 - \sin \gamma \sin \beta_1)}{r_m + r \sin \beta_1} \dots (6)$$

$$\frac{\omega_i - \omega_c}{\omega_b} = \frac{r (\cos \gamma \cos \delta \cos \beta_2 + \sin \gamma \sin \beta_2)}{r_m + r \sin \beta_2} \dots (7)$$

$$\frac{\omega_i}{\omega_b} = \frac{r}{(r_m + r \sin \beta_1) (r_m + r \sin \beta_2)} \left[\cos \gamma \cos \delta \left\{ r_m (\cos \beta_2 + \cos \beta_1) \right\} \right]$$

$$+r\sin(\beta_1+\beta_2)\Big\} + r_m\sin(\sin\beta_2-\sin\beta_1)\Big] \dots \textcircled{8}$$

$$\frac{\omega_i}{\omega_c} = 1 + \frac{r_m + r\sin\beta_1}{r_m + r\sin\beta_2} \cdot \frac{\cos\gamma\cos\delta\cos\beta_2 + \sin\gamma\sin\beta_2}{\cos\gamma\cos\delta\cos\beta_1 - \sin\gamma\sin\beta_2} \dots \textcircled{9}$$

これらの式において上輪及下輪において $\beta_1 = \beta_2$ と仮定することにより⑧、⑨式により計算上の ω_i/ω_b 、 ω_i/ω_c が求まる。この値と計測波形から求まった ω_i/ω_b 、 ω_i/ω_c により玉の運動の変化を理論上の動きと比較した。

6. 実験結果及考察

Figs. 7～11, ZF_c/P_a に対する軸転と自転及公転比の変動状態を示している。

本研究ではホール素子によってスラスト玉軸受の玉の運動を計測するため、ホール素子を設ける関係上、保持器付きで実験を行った。従って隣りあう玉どうしの衝突などによる干渉についてはデータを得ていない。玉の公転については従って保持器の回転がそのまま公転数として得られることになり Fig. 7-(a)に示される毎く無潤滑においてはほぼ理論値 0.5 の値をとる。しかし転走面に潤滑剤を少量塗付した場合は、Fig. の黒丸印で示されるように $Z \cdot F_c/P_a$ の値が 0.2 近辺から急にすべりを生じている。即ち Fig. 7-(b)の玉の自転すべりが0.2近辺から著しくなるためそれ

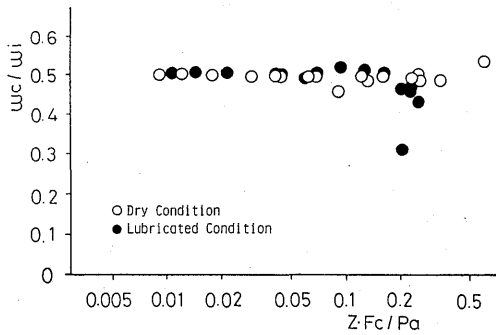


Fig. 7-a Relation between ω_c/ω_i and ZF_c/P_a

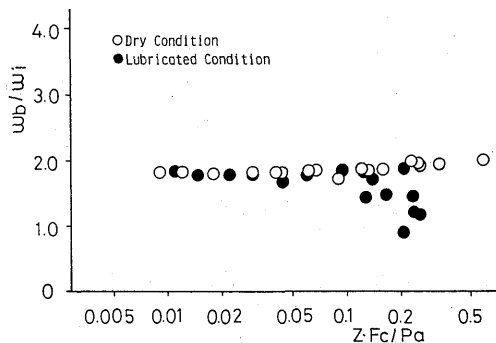


Fig. 7-b Relation between ω_b/ω_i and ZF_c/P_a

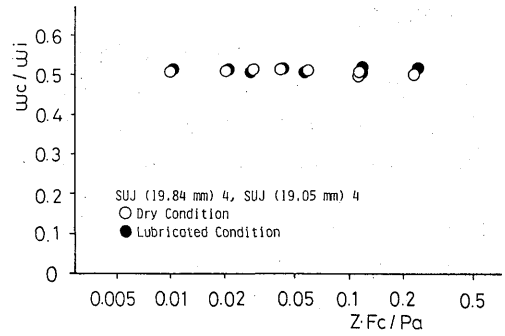


Fig. 8-a Relation between ω_c/ω_i and ZF_c/P_a

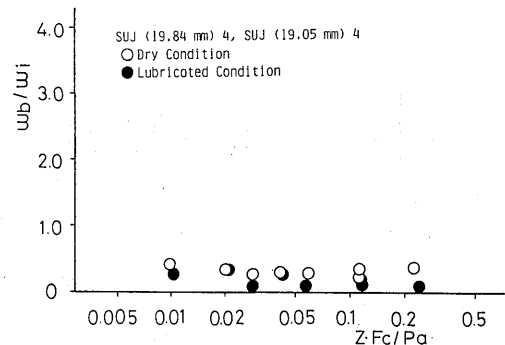


Fig. 8-b Relation between ω_b/ω_i and ZF_c/P_a

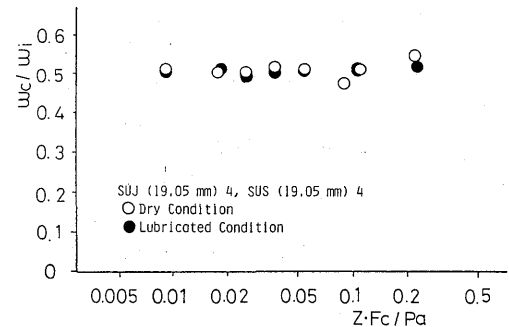


Fig. 9-a Relation between ω_c/ω_i and ZF_c/P_a

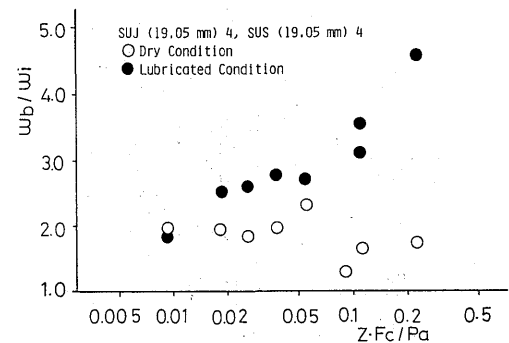
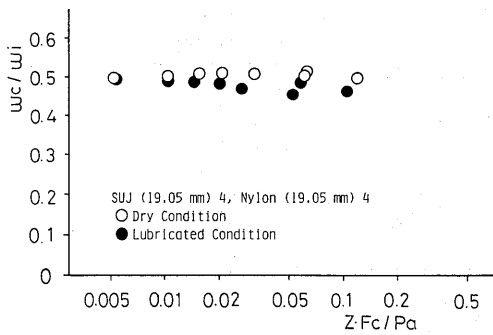
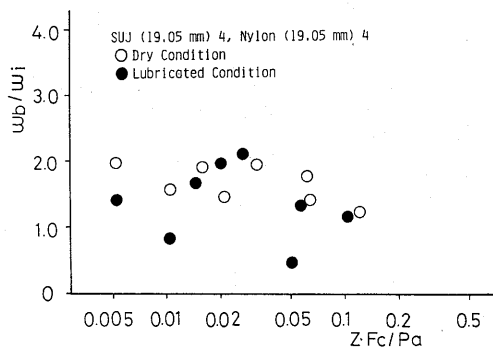
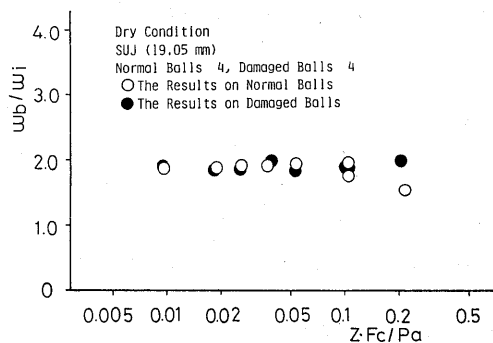
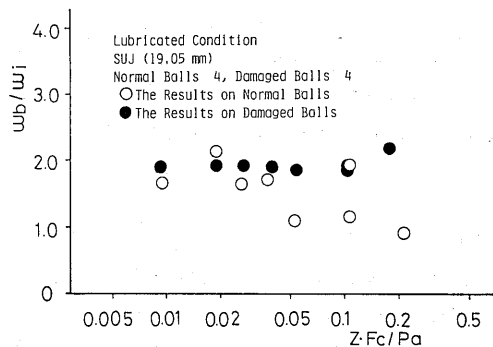


Fig. 9-b Relation between ω_b/ω_i and ZF_c/P_a


 Fig. 10-a Relation between ω_c/ω_i and ZF_c/P_a

 Fig. 10-b Relation between ω_b/ω_i and ZF_c/P_a

 Fig. 11-a Relation between ω_c/ω_i and ZF_c/P_a

 Fig. 11-b Relation between ω_b/ω_i and ZF_c/P_a

に伴って公転にもすべりを生じ理論値を大きく下まわることになる。このように玉軸受においては、機構上存在するスピン摩擦などによる摩擦損失を防止するうえで転走面上の潤滑は避けることができないが同時にすべりを生じ玉の運動を乱す原因ともなっている。即ちころがりすべり接触面での摩擦の軽減が玉の運動を乱す。

Fig. 8 に玉の径を大径・小径混在させた場合の小径についての計測結果をしめしているが ω_c/ω_i については理論的な回転をしている。この場合潤滑状態でも ZF_c/P_a の大きい値で ω_c/ω_i の低下をもたらさないのは異径のため大径の玉一個の面圧 P_a が同径球のみの場合と異なるためである。自転・軸転比はこの条件下では潤滑状態・無潤滑状態の如何にかかわらずころがり・すべり面上での面圧不足による著しいすべりを生じているため理論値を著しく下まわる。換言すると大径球・小径球混在の場合、スラスト玉軸受においては小径球の運動は極めて不安定であることが明らかである。

つぎに Fig. 9(a)(b)では玉の材料の異なる場合の運動の乱れを示した。この条件のもとで磁化球を含むSUJ球は、SUS球径にくらべてほぼ20μm玉の径が小さい。理論的にはスラスト玉軸受において玉が軌道輪を外れ公転半径が増加すると自転・軸転化は増加する。いままでにみた結果で軌道半径が増加している筈の小径において理論値をはるかに下まわっているのはここで使用したスラスト玉軸受に保持器が用いられているにほかならぬ。しかし Fig. 9(a)(b)は保持器内のポケット内での現象を玉径差が僅少であるために巧みにとらえられた1例である。とくに Fig. 9(b)において無潤滑状態においてはSUJ球上の計測値は多少の乱れはあるがほぼ理論値を示す。しかし潤滑状態ですべり量が増すにもかかわらず僅かばかり径の小さいSUJ球上で自転が増加しているのは遠心力で軌道輪が保持器ポケット内の許容範囲で外側に偏りさらに潤滑されているために玉とポケット端との摩擦が軽減されていることによる。

Fig. 10(a)(b)には8個のスラスト球のうち4個をナイロン球でおきかえた場合であるが公転については保持器の回転を示すため異常をしめさないが、自転についてはナイロン球の遠心力の相違が加わるため ZF_c/P_a の小さい範囲からすでに大きな乱れが生じている。

Fig. 11(a)(b)は正常な球と球面に損傷を設けた球とを同数ずつ混在させ損傷及正常球の自転変化を追ったものであるが無潤滑状態では両方に目立った差はなく、理論値に近い挙動を示す。しかし潤滑状態におい

ては正常球においてはこれまでの結果と同様に ZF_c/P_a の高い範囲ですべりを生じているが、損傷球については乱れが少ない。即ち表面に多くの損傷があるため十分にすべることができず、かえって安定した運動を保っていることを示すもので、ころがりすべり面における大きなすべりの存在がいかに大きく玉の運動に影響するかを示唆するものである。

Figs. 12, 13, 14は計測した波形により合成したリサージュ図を示す。x-y面、y-x面及びx-z面に於て回転中に運動の乱れがない場合はそれぞれY軸に平行、y-z面上での円、Z軸に平行な線図を示すことになる。

Fig. 12(a)はFig. 12(b)の波形より求めたもので正常な玉の運動リサージュ図を示す。しかし他の2つは運動の異常さを示すもので、このようにリサージュ波形を求めることにより玉の運動の三次元的挙動をはっきりと知ることができる。

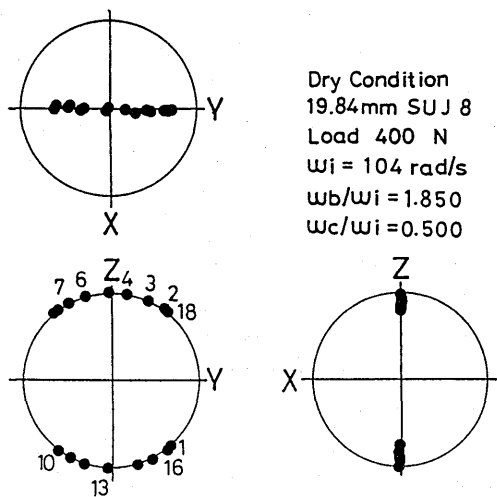


Fig. 12-a Lissajous figure

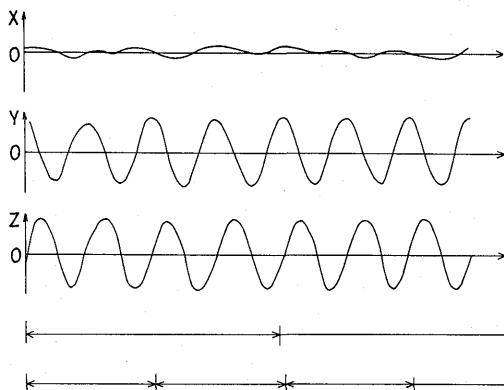


Fig. 12-b Explanation of Oscillogram

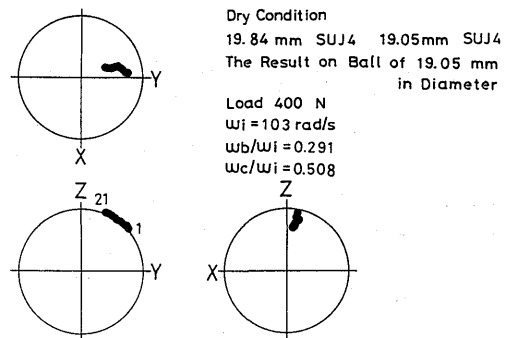


Fig. 13 Lissajous figure

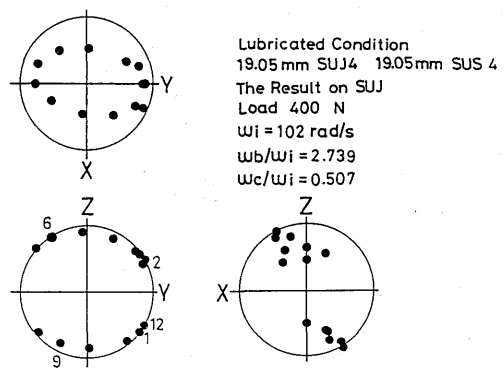


Fig. 14 Lissajous figure

7. 結 言

以上スラスト玉軸受の玉の運動についてホール素子を用いて計測することにより正常な回転からの玉の三次元的変動を知ることができた。

すなわち、潤滑状態で面内すべりが大きいだけではなく、小径球を用いることによってスラスト負荷割合が少なくなると保持器で玉が隔離されている場合には著しくすべること、リサージュ波形を調べることによってその乱れは三次元的に非常に複雑な動きをしていること、寸法差の小さい異球が混入されている場合には保持器のポケット孔端面と玉のすべりが大きく影響すること、損傷球のころがりすべり挙動から面のあらさや微小突起がすべりを著しく減じることなどが明らかにになった。

文 献

- 1) Hirano, F. & Tanoue, H.; Wear Vol 31 No. 3 (1961) p. 133
- 2) 川北; 日本潤滑学会第25期講演論文集 A 19 (1981)

- 3) 川北；日本機械学会講演論文集
No. 810-13 (1981)
- 4) 有吉・川北・平野；日本機械学会講演論文集
No. 820-16 (1982)
- 5) 浦・吉岡・中嶋・森高；日本機械学会講演論文集
No. 851-1 (1985)

